

光束偏振性对切割质量影响的研究

李 勇, 张显斌

(西安理工大学理学院, 陕西 西安 710048)

摘 要:针对光束偏振态对切割质量的影响进行了实验探究。实验中,分别采用线偏振 CO₂ 激光和圆偏振 CO₂ 激光对 6 mm 低碳钢板进行切割,结果表明,使用线偏振光切割时,光束在不同切割方向上产生的切缝宽度不同,挂渣程度也不一样。而采用圆偏振光切割时,切缝宽度一致性良好,且无明显挂渣现象。从光能的吸收和反射两个方面解释了产生这种现象的原因。给出了在激光切割时,为了获得良好的切割效果应采取的措施。

关键词:偏振态; CO₂ 激光; 切割质量; 措施

中图分类号: TG485

文献标识码: A

Study on the influence of beam polarization on quality of laser cutting

LI Yong, ZHANG Xian-bin

(School of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Influence of beam polarization on laser cutting quality has been experimentally studied. In the experiments, linearly polarized and circularly polarized CO₂ laser were used to cut 6mm low carbon steel sheets. Results show that when making linearly polarized laser cutting, different cutting directions have different kerf width and the degree of dross is also not the same. When making circularly polarized laser cutting, kerf width are of good consistency and no dross phenomenon occurs. Explanation to this phenomenon is given out from the point of view of light absorption and reflection. The paper also offers means to be taken in laser cutting in order to get good cutting quality.

Key words: polarization; CO₂ laser; cutting quality; measures

1 引 言

随着激光技术的不断发展,激光加工在工业上的应用日益广泛。激光切割金属材料是激光加工中最常见的一种应用。激光切割是一种非接触式切割方法,与传统的切割方法相比,激光切割具有切割质量好、生产效率高、使用范围广、生产成本低等优点。激光切割实际上是利用聚焦镜将高能激光聚焦到材料表面,产生足够使材料熔化甚至气化的高温,再以辅助气体喷射吹化使材料分离,从而达到切割的目的。

在激光切割的实践中,许多因素影响着切割质量。近年来研究者们,对影响切割质量的因素进行了许多研究,国内一些高校的研究者们对辅助气体和喷嘴,气流和切速等工艺参数进行了深入研究^[1-4],还有一些研究者从辐射吸收和切割成形理

论出发,研究了切割理论^[5-10],分析了热源运动时的热扩散、辅助气体的作用、流体动力学过程、切壁上条纹的形成等。Schulz W^[11]等人研究了偏振光束在切割前表面的吸收,给出了焦点位置和模结构的影响,但没有分析光束偏振性对切割质量的影响。Petring D^[12]等人提出的激光切割三维模型中考虑到了强度、偏振态、焦点位置、光斑模式及光束发散角对切割工艺的影响,但仅限于对切割形状的简单描述,没有给出理论上的分析。国内的一些工程师在实践中注意到了光束偏振性对切割质量的影响,

基金项目:陕西省教育厅科学研究计划项目(No. 8JK402)资助。

作者简介:李 勇(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光技术与激光器件的设计。E-mail:liyong88285409@sina.com

收稿日期:2010-08-17; **修订日期:**2010-09-24

但没有给出合理的解释。本文在实验的基础上,从理论上解释光束偏振性对切割质量的影响。

2 实验

本次实验使用的激光器为德国 rofin 公司的 rofin DC035,输出功率为 3500 W,光斑模式为 TEM_{00} ,线偏振,切割过程采用 O_2 作为辅助气体,气体压力为 0.6 MPa,切割速度为 4 m/min,实验材料为低碳钢板,厚度为 6 mm。聚焦镜焦距为 190.5 mm。

激光器输出的激光束,经两个 45° 全反镜和一个聚焦透镜,聚焦到工件表面。实验装置简图如图 1 所示。

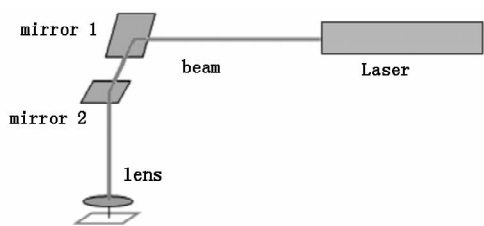


图 1 激光切割装置结构简图

Fig. 1 sketch of laser cutting equipment

实验中进行了两次切割,第一次直接将激光束经两片 45° 全反镜反射后聚焦,第二次将 mirror 1 更换为反射式 $\frac{\lambda}{4}$ 相位延迟片(反射式圆偏振镜)将线偏振光转变成圆偏振光后再聚焦,两次得到的切割效果如图 2、图 3 所示。

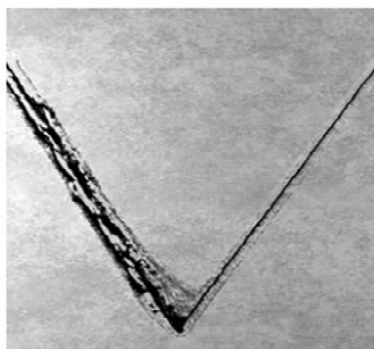


图 2 线偏振光切割效果

Fig. 2 effect of linearly polarized light cutting

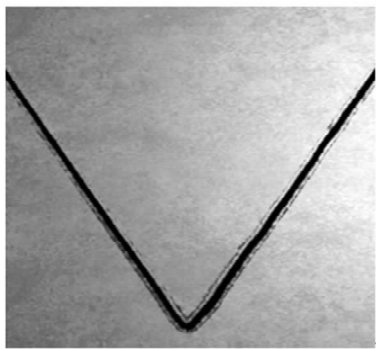


图 3 圆偏振光切割效果

Fig. 3 effect of circularly polarized light cutting

对比两次切割效果,不难看出,直接将线偏振光聚焦后进行切割,得到的切缝大小不均匀,光束在不同运动方向上得到的切缝大小不同,且在一边有严重的挂渣现象。在光路中加入反射式圆偏振镜后,激光的偏振态变为圆偏振,使用圆偏振光切割,得到的切缝大小均匀,且无明显挂渣现象。

3 实验结果分析

为了便于分析,建立如图 4 所示坐标系。

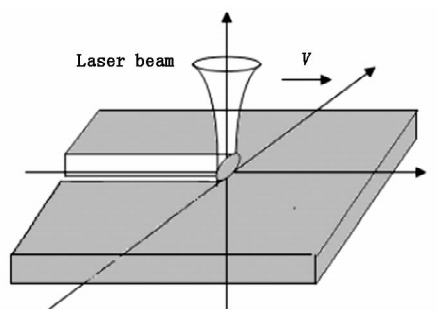


图 4 样品和光束在坐标系中的位置

Fig. 4 position of sample and beam in the coordinate system

光束沿 X 方向运动,则光束强度为:

$$I(x, y, z, t) = \frac{I_0}{1 + L^2(z)} \exp \left\{ -\frac{8[(x - vt)^2 + y^2]}{d^2(1 + L^2(z))} \right\} \quad (1)$$

其中, $L(z) = (z - z_f)/z_0$, $z_0 = \pi d^2/\lambda$, d 为光斑直径; z_f 为光束焦点与工件表面的距离。 z 为 x, y, t 的函数。

定义 P 是吸收的光功率密度,则:

$$P = I(x, y, z, t) F(\alpha, \beta - \beta_0) \cos \alpha \quad (2)$$

其中, $F(\alpha, \beta - \beta_0)$ 是吸收系数; α 是光束在材料表面上的入射角。

$$\alpha = \arctan \sqrt{z_x^2 + z_y^2} \quad (3)$$

式中, β 是光束入射方向与运动方向之间的夹角。

$$\beta = \arctan(z_y/z_x) \quad (4)$$

β_0 为电场矢量与速度矢量之间的夹角,对于线偏振光而言, β_0 为常数。

对于线偏振光而言,吸收系数:

$$F_L(\alpha, \beta - \beta_0) = F_s(\alpha) \sin^2(\beta - \beta_0) + F_p(\alpha) \cos^2(\beta - \beta_0) \quad (5)$$

其中, $F_s(\alpha)$, $F_p(\alpha)$ 分别为 S 光和 P 光的菲涅尔吸收公式。

对于圆偏振光:

$$F_c(\alpha) = [F_s(\alpha) + F_p(\alpha)]/2 \quad (6)$$

将式(5)、式(6)代入式(2)中:

$$P_L = I(x, y, z, t) [F_s(\alpha) \sin^2(\beta - \beta_0) + F_p(\alpha) \cos^2(\beta - \beta_0)] \cos \alpha \quad (7)$$

$$P_s = \frac{1}{2} I(x, y, z, t) [F_s(\alpha) + F_p(\alpha)] \cos \alpha \quad (8)$$

对线偏振光,由式(7)可以看出,当入射光与材料表面的入射角确定以后,光束与运动方向之间的夹角也确定了,如 $\alpha = 0$ 时 $\beta = \pi/2$,电场矢量与速度矢量之间的夹角决定了吸收光功率密度。当速度矢量与电场矢量相垂直时,即 $\beta_0 = \pi/2$ 时,以P分量吸收为主,当速度矢量与电场矢量相平行时,即 $\beta_0 = 0$ 时,以S分量吸收为主。当速度矢量与电场矢量具有一定夹角时,P分量与S分量的吸收比例与夹角相关。

从反射的角度讲,对于激光切割,通常是将光束聚焦后正入射到材料表面,但是仅当开始切割时,聚焦光线才会以正入射的方式到照射材料表面。一旦切缝形成,光束会以某个较大的入射角 θ 入射金属切割面,如图5所示。相对于金属切割面呈S偏振的光比呈P偏振的光更容易被此表面反射,在P分量吸收为主的运动方向上,由于S偏振光的反射,造成了在切缝的一条边上有挂渣,和切缝变宽的现象。在S分量吸收为主的运动方向上,由于P分量反射率小,光能量集中,此时的切缝细而且光滑。这与图2和图3中的实际切割效果相吻合。

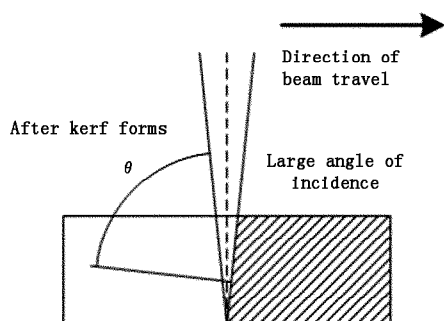


图5 切缝形成后产生的大角度入射

Fig. 5 large angle of incidence after kerf forms

对圆偏振光,由式(8)可知,其吸收功率密度仅与光束入射到材料表面的角度有关。圆偏振光在任何光束矢量方向上都是由等量的S偏振和P偏振组成的,因此在所有的轴向都会具有相同振幅,无论切割方向如何,都将以均一的方式去除材料,使切缝比较均匀光滑。在光束传递路径上引入一个反射式 $\frac{\lambda}{4}$ 相位延迟片将线偏振光转换为圆偏振光,能大大提高切割质量。

4 结 论

实验中使用线偏振光进行切割,得到的切缝在不同运动方向上宽度不同,且挂渣现象严重。在光

路中加入 $\frac{\lambda}{4}$ 相位延迟片,将线偏振光转换成圆偏振光进行切割,得到的切缝宽度均匀且无挂渣。经研究表明:①对于线偏振光,材料对光功率的吸收系数不仅与光束入射角有关,而且还与光束电场矢量与速度矢量之间的夹角有关;②对于圆偏振光,材料对光功率的吸收系数只与光束的入射角有关;③在激光切割过程中,仅在切割开始时,光束垂直入射到材料表面,一旦切缝形成,激光与切面的夹角变大,相对于切面成S偏振的光比相对切面成P偏振的光更容易反射;④以P分量吸收为主时,由于S偏振光的反射,造成了切缝变宽且一边上有挂渣。以S分量吸收为主时,由于P分量反射率低,光能量集中,此时产生的切缝宽度均匀而且无挂渣。

参考文献:

- [1] Huang Kaijin, Zeng Dawen, Xie Changsheng. The effects of curvature radius and cutting speed on the top kerf width of laser cutting of thin pipe with a small diameter[J]. Laser Technology, 2000, 24(1): 51-54. (in Chinese)
黄开金, 曾大文, 谢长生. 曲率半径和切速对小管径激光切缝宽度的影响[J]. 激光技术, 2000, 24(1): 51-54.
- [2] Hu Jun, Qiu Mingyong, Guo Shaogang. Effect of gas outlet mach number on mach shock disk in laser cutting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(11): 1789-1794. (in Chinese)
胡俊, 邱明勇, 郭韶刚. 激光切割气体出口马赫数对马赫盘的影响[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1789-1794.
- [3] Shi xiaoqiang. Laser cutting of low carbon steel sheets[J]. Laser technology, 1998, 22(6): 343-345. (in Chinese)
史晓强. 低碳钢板的激光切割[J]. 激光技术, 1998, 22(6): 343-345.
- [4] Guo Shaogang. Analysis of high pressure assisted gas flow in laser cutting and improvement of nozzle[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
郭韶刚. 激光切割中高压辅助气体流场分析及喷嘴结构改进[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [5] Simon G, Gratzke U. Theoretical investigations of instabilities in laser gas cutting[C]. Proc. SPIE, 1989, 1132: 204-209.
- [6] La Rocca A V, Rorsati L, Cantello M. Nozzle design to fluid dynamics in laser cutting[C]. Proc. SPIE, 1994, 2207: 48-62.
- [7] Schuocker D. Theoretical model of reactive gas assisted laser cutting including dynamic effects[J]. Appl. Phys.

- B,1986,40:9 – 14.
- [8] Vicanek M, Simon G. Momentum and heat transfer of an inert gas jet to the melt in laser cutting[J]. Phys. D: Appl. Phys., 1987,20:1191 – 1196.
- [9] Kaplan A F H. An analytical model of metal cutting[J]. Appl. Phys,1996,79:2198 – 2199.
- [10] Kaplan A F H, Wangler O, Schuocker D. Laser Cutting: Fundamentals of the periodic striations and their on-line direction[J]. Laser Engineering,1997,2:103 – 126.
- [11] Schulz W, Simon G, Urbassek H. On fusion cutting metal[J]. Phys. D: Appl. Phys,1986,20:481 – 488.
- [12] Petring D, Abels P, Beyer E. Absorption distribution on idealized cutting front geometries and its significance for laser beam cutting[C]. Proc. SPIE,1020:123 – 131.